

激光等离子体中的吸收及 K_{α} 线产生机制

卢仁祥 丁丽明 顾 援
(中国科学院上海光学精密机械研究所)

提 要

用 10^{14} W, 100 ps 的高功率激光以不同的偏振形式 (P 或 S 偏振) 聚焦照射到铝靶表面。用 X 光晶体谱仪拍摄到铝的 LPX 谱线。激光等离子体的电子温度随入射角的变化, 说明了在 10^{15} W/cm² 功率密度下, 存在着共振吸收机制。LPX 光谱强度计算表明, 在我们的实验条件下, 固体铝靶的 K_{α} 线大部分起源于快热电子。

一、引 言

在激光功率密度较低时 ($<10^{14}$ W/cm²), 等离子体对高功率激光的吸收机制主要是逆韧致吸收, 当激光聚焦在靶上的功率密度进一步提高时, 共振吸收与参量吸收将起主要作用, 而功率密度达 10^{17} W/cm² 以上时, 相对论吸收也将起重要作用。曾有报导功率密度达 10^{15} W/cm² 时主要吸收机制为共振吸收^[1], 如 Manes 等人^[2] 用长焦距透镜打靶, 以盒式卡计记录激光吸收与入射角的关系, 表明对于 P 偏振, 在 $\theta=20^{\circ}$ 时, 有一吸收峰值, 而对 S 偏振, 吸收随入射角的增大而单调下降。

本文则报导了在我们的实验条件下的结果: 用 X 光晶体谱仪拍摄在不同偏振及不同入射角时铝的 LPX (激光等离子体 X 射线) 光谱, 再在稳态日冕模型条件下从铝的两条类氢、类氦共振线强度比推算出等离子体电子温度, 表明在 10^{15} W/cm² 的激光功率密度下, 确实存在着共振吸收, 并求出密度变化的标尺长度约 $3.3\mu\text{m}$ 。

用高功率激光激励固体靶时与高阶电离 X 光谱同时产生的 K_{α} 谱线的成因曾引起争议。一种认为 K_{α} 线是高阶电离离子的 X 射线直接激励引起的^[3], 另一种却认为是等离子体中的热电子激发引起的^[4], 本文所引实验的数据, 支持后者的观点。

二、实验条件及结果

1. 实验条件

利用六路高功率激光器件^[5], 激光能量约 10 J, 脉宽为 100 ps, 经由孔径 $\phi 60$ mm, 焦距为 120 mm 的非球面透镜, 照射到固体铝靶表面, 靶面功率密度达 10^{15} W/cm² (如图 1 所示)。在实验中靶面法线与入射激光束的夹角 θ (入射角), 在各次发射中可以调节变化。

在实验中, 考虑到在透镜聚焦的焦斑 (即高斯光束光腰) 附近, 光束与靶法线夹角主要由高斯光束的光轴所决定, 所以采用 $f/2$ 的透镜而没有象文献 [2] 那样用 $f/10$ 的长焦距透镜。

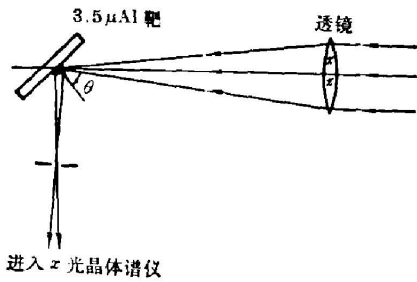


图 1 高功率激光打靶示意图

Fig. 1 Experimental arrangement of high power laser targets

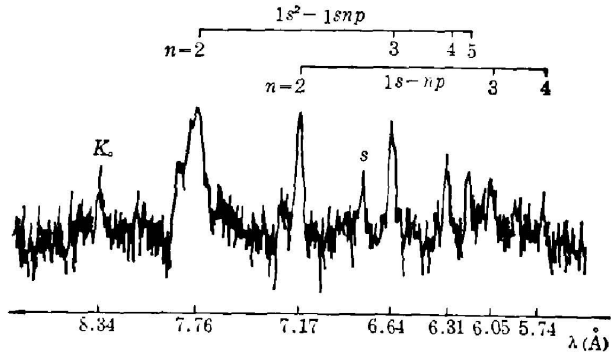


图 2 铝的激光等离子体 X 光谱 (S 偏振, $\theta=30^\circ$)

Fig. 2 X-ray spectrum of an aluminium plasma (S -polarization, $\theta=30^\circ$)

在与入射光束成 90° 的方向上,用 X 光晶体谱仪^[6]拍摄 LPX 光谱,狭缝离焦点 1 cm,等离子体点源到底片的距离约为 7.65 cm, X 光衍射晶体采用 TLAP 晶体 ($2d=25.78 \text{ \AA}$),摄谱范围为 $4.5 \sim 15 \text{ \AA}$ 。采用作过黑度定标曲线的 X 光底片记录。

2. 实验结果

在 P 及 S 偏振两种入射光束的情况下,改变入射角 θ ,从所拍摄的 LPX 光谱中,求出铝等离子体类氢及类氦共振线强度,图 2 就是一张典型的 LPS 光谱 (S 偏振, $\theta=30^\circ$),图中已标出了与类氢或类氦跃迁相应的波长及跃迁主量子数。

基于稳态日冕模型^[22]的电子温度计算要求满足两个条件^[7,8]:第一个条件要求电子密度不能太稠密,以致于碰撞过程为主,即

$$N_e < 10^{16} z^7 (kT/I_z)^{1/2} \text{ [cm}^{-3}\text{]},$$

其中 I_z 为电离势, z 为发射离子的原子序数。在铝的情况下 ($z=13$),不等式右边约为 $10^{23}/\text{cm}^3$,该条件是符合的。

第二个条件要求为

$$\tau \geq 10^8 z^3 n_e,$$

式中 τ 为等离子体动力学特征时间, n_e 为电子密度,将 $z=13$ 及 $n_e = 10^{21}/\text{cm}^3$ 代入,有 $\tau = 220 \text{ ps}$,而激光脉宽仅 100 ps ,这表明稳态日冕模型只是一个较为粗糙的近似。

图 3 表示在 P 及 S 偏振情况下,等离子体电子温度与入射角的关系,对 S 偏振,电子温度基本上随 θ 的增大而单调下降;而对 P 偏振,电子温度在 $\theta=15^\circ$ 处有一极大值,这种吸收极大值符合于共振吸收机制的理论预测^[9]。

从极大吸收的 θ 值,可以推导出等离子体密度变化的标尺长度 $L = (0.7/\sin \theta)^{1/3}/k_0$,式中 k_0 为激光波数, $k_0 = 2\pi/\lambda = 5.93 \mu\text{m}^{-1}$ 。当 $\theta=15^\circ$,求得 $L = 3.3 \mu$ 。电子密度在这样短的距离内发生显著的变化,说明在激光等离子体中存在密度变陡现象^[10]。

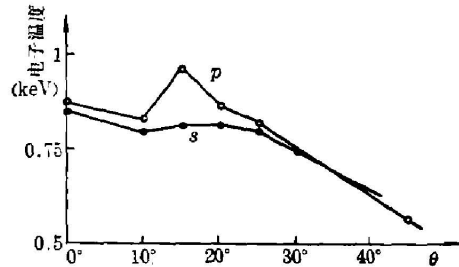


图 3 在 S 及 P 偏振情况下,等离子体电子温度对不同入射角激光的变化

Fig. 3 Electron temperature varying with different incident angles under S -polarization and P -polarization

另一方面在图 2 的 LPX 谱中出现了铝的 K_{α} 线谱, 它是 $1s$ 能级离化后离子辐射的特征。从激光等离子体中发射的电子和 X 射线均可穿透入内层未加热的材料, 并产生 K 空穴, 进而以一定的分支比产生俄歇电子及 K_{α} 荧光辐射, 有一定几率的 K_{α} 荧光辐射, 就有相应的自电离电子, 而这些自电离电子大部分转化为热。因此 K_{α} 辐射可以用来测定靶内部的能量吸收。

以上分析说明 K_{α} 谱有两种产生机制: 一种是 LPX 通过光电效应在低电离离子中产生 K 空穴。另一种是激光等离子体中高能电子直接碰撞激励 K 壳层电子引起的, 对这两种可能性我们分别加以论证。

首先, 从图 2、3 可知在本实验条件下, 等离子体电子温度已达 $10^6 \sim 10^7 \text{K}$, 铝的激光等离子体发射出强烈的类氢、类氦线谱, 且这些线谱都比铝的 K 吸收限 ($\lambda = 7.95 \text{\AA}$) 的波长短。因此, 从最有利于产生光电效应的波长来看, 铝本身的 LPX 激励 K 空穴最为有效。

其次, 在 10^{15}W/cm^2 的激光靶面功率密度下, 根据定标定律产生超热电子的温度^[13]为 $kT_H = 2.6(I\lambda^2)^{0.425}$, 其中 I 以 10^{14}W/cm^2 为单位, 则 $kT_H = 7.3 \text{keV}$ 。

能量为 E 的电子通过电离作用引起的能量损失为^[14]

$$\left(-\frac{dE}{dx}\right) = \frac{2\pi e^4 N z}{m_0 v^2} \left\{ \ln \frac{E(E+m_0 c^2)^2 \beta^2}{2I^2 m_0 c^2} - [z(1-\beta^2)^{1/2} - 1 + \beta^2] \ln z + (1-\beta^2) + \frac{1}{z} [1 - (1-\beta^2)^{1/2}]^2 \right\},$$

式中 v 为电子速度, $\beta = v/c$, m_0 为电子质量, z 为阻止物质原子序数, I 为平均激发电位 $I = (9.76 + 58.8z^{-1.19})z(\text{eV})$ 。对铝 $z = 13$, 就各种能量值求出 dE/dx , 最后从数值积分得能量为 E 的电子的平均射程^[14]

$$\bar{R} = \int_0^E \left(-\frac{dE}{dx}\right)^{-1} dx.$$

我们发现当 E 在 $(1 \sim 100 \text{keV})$ 区间时, 有近似公式 $\bar{R}(\mu\text{m}) = 0.026 E^{1.72}(\text{keV})$ 。当 $E = 7.3 \text{keV}$ 时, $\bar{R} = 0.72 \mu\text{m}$; $E = 100 \text{keV}$, $\bar{R} = 71 \mu\text{m}$ 。

以上结果说明在靶面功率密度大于 10^{14}W/cm^2 时, 参量不稳定性确实可以激发起超热电子, 因而在铝靶表面约 $10 \mu\text{m}$ 量级处通过电子电离效应激发出 K_{α} 谱线是可以理解的。

从图 2 所获得的 LPX 实验数据, 可以求出铝的 K_{α} 谱线强度与铝的诸类氢、类氦谱线 (包括伴线及复合连续 X 光) 强度之比高达 8%, 而由文献[11]可知当波长在 $6 \sim 7.95 \text{\AA}$ 范围内激发铝靶 K_{α} 谱的效率约为 0.95%, 这表明实际上所获得的 K_{α} 谱线强度是 LPX 单一因素激发 K_{α} 谱的 8 倍, 说明 LPX 不是激发 K_{α} 荧光的主要机制。

我们这种情况不同于文献[3]的机制分析, 那里认为 LPX, 热电子及超热电子产生 K_{α} 光子的比例为 100:3:2。但我们的定量数据也不同于文献[4]所给出的值, 在那里激光等离子体中快速电子激励的 K_{α} 光子效率将是 LPX 激发效率的 100 倍。

当然本文只是从排它法推出在我们的实验中快速电子是产生 K_{α} 光子的主要原因, 结果还是非常粗糙的, 更详细的讨论应该在实验上获得绝对定标的电子能谱, 并对各种能量电子引起 K_{α} 几率作精确的计算。此外, 还应摄得更清晰的 K_{α} 空间分辨谱, 以精确地确定 K_{α} 线产生的空间位置, 而且这样的实验用双层靶可能更为有利。

本实验是在我所六路高功率激光实验装置上完成的,毛楚生同志参加了部分工作,实验中获得邓锡铭、余文炎、谭翰维同志的关心和支持,陈时胜、毕无忌、赵庆春等同志在工作中给予了大力帮助,谨致谢意。

参 考 文 献

- [1] J. E. Balmer, T. P. Donaldson; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, No. 17 (Oct), 1084. R. P. Godwin *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, No. 19 (Nov), 1198. J. S. Pearlman; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **38**, No. 24 (Jun), 1397.
- [2] K. R. Manes *et al.*; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **39**, No. 5 (Aug), 281.
- [3] N. Yamaguchi; *J. Phys. Soc. Japan*, 1979, **47**, No. 1 (Jul), 299.
- [4] A. Zigler *et al.*; *Phys. Lett. (A)*, 1977, **63A**, No. 3 (Nov), 275.
- [5] 邓锡铭等;《光学学报》, 1981, **1**, No. 4 (Jul), 289.
- [6] 卢仁祥等;《光学学报》, 1982, **2**, No. 6 (Nov), 568.
- [7] H. R. Griem; *Plasma Spectroscopy*, McGraw-Hill Company, New York, (1964), 176.
- [8] B. Yaakobi, T. C. Bristow; *Phys. Rev. Lett.*, 1977, **38**, No. 7 (Feb), 350.
- [9] B. J. 金兹堡著;《电磁波在等离子体中的传播》, (科学出版社, 北京, 1978).
- [10] E. J. Yalio, W. L. Kruer; *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**, No. 13 (Sep), 350.
- [11] 刘永康等编译;《电子探针 X 射线显微分析》, (科学出版社, 北京, 1973), 195.
- [12] A. H. Gabriel; *Mon. Nat. Roy., Astr. Soc.*, 1972, **160**, No. 1, 99. В. А. Бойко и др.; *Квант. Электрон.*, 1977, **4**, No. 3 (Mar), 600.
- [13] H. J. Schwarz *et al.*; *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena*, (Plenum Press, New York, 1981), Vol. 5, 257.

Absorption in laser produced plasma and the mechanism of K_{α} spectral line

LU RENXIANG DING LIMING AND GU YUAN

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 8 March 1982)

Abstract

Using 0.1 TW, 100 ps pulse-width high-power laser to irradiate the surface of plane aluminium targets with different polarizations (P -polarization or S -polarization), the LPX spectral line of aluminium ions was photographed by a X-ray crystal spectrometer. The relation between electron temperature of laser plasma and the incident angles of the laser beam was obtained. It shows that there is resonant absorption in the plasma when the laser power density is in the order of 10^{15} W/cm². The K_{α} spectral line emitted by the aluminium target originates mainly from fast electrons in our experimental conditions.